

УДК 622.235

М.Д. Ефремова, Г.И. Кулаков, Г.В. Морозова

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ МЕДНЫХ, БРОНЗОВЫХ И ЛАТУННЫХ
ОБРАЗЦОВ КАК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ ***

Рассмотрены особенности ЭМИ конструкционных материалов – меди, латуни, бронзы, приводятся результаты исследований с использованием вычислительно-измерительной системы, выполненной на основе модуля фирмы National Instruments USB9215A. Кратко изложена методика проведения экспериментов и полученные результаты.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система, шахтная крепь, пластическая деформация, горная промышленность.

Семинар № 13

**M.D. Efremova, G.I. Kulakov,
G.V. Morozova
FEATURES OF
ELECTROMAGNETIC EMISSION (EME)
OF COPPER, BRONZE AND BRASS
SAMPLES AS CONSTRUCTIONAL
MATERIALS AT COMPRESSING
LOADING**

Features of EME constructional materials – copper, brass and bronze are considered, results of researches with the use of calculating-measuring system executed on the basis of National Instruments USB9215A module are resulted. It is shortly stated the technique of carrying out experiments and received results.

Key words: informational-computation system, mine timbering, plastic deformation, mining industry.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-08-33686).

В горной промышленности широко используются машины и конструкции из конструкцион-

ных материалов, подвергающиеся в процессе эксплуатации усталостному разрушению, особенно при циклическом нагружении, когда амплитуды разрушающей силы существенно уменьшаются с ростом числа циклов нагружения. При исследованиях усталостного разрушения выделяют два направления: механизм такого разрушения и получение и обработку экспериментальных данных, позволяющих оценивать усталостную прочность и долговечность эксплуатируемых конструкций [1-2].

Методы и аппаратура исследования. Рассматриваемая ниже информационно-измерительная система предназначена для экспериментального изучения воздействия сжимающей нагрузки на стержни из меди и ее сплавов как при исследовании механизмов усталостного разрушения, так и в целях получения и анализа экспериментальных данных при оценке усталостной прочности и долговечности материала. Принцип действия информационно-измерительной системы

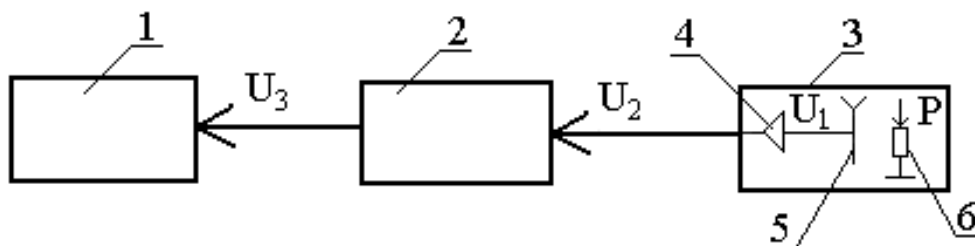


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной системы: 1 – персональный компьютер; 2 – модуль NI USB9215A; 3 – ручной пресс; 4 – измерительный усилитель типа INA 128U; 5 – цилиндрическая дифференциальная конденсаторная антенна; 6 – экспериментальный образец; P – нагрузка; U_1 – сигнал ЭМИ; U_2 – сигнал на входе модуля 2; U_3 – оцифрованный сигнал ЭМИ

основан на регистрации сигналов электромагнитной эмиссии, излучаемой нагруженными элементами конструкций при формировании в них микротрещин и трещин [3], причем в этом процессе всегда участвуют усталостные трещины и микротрещины, что заметно снижает прочность конструкций.

Используемая информационно-вычислительная система включает персональный компьютер в качестве вычислительного устройства, а для сбора данных задействован внешний блок USB9215A, подключаемый к порту USB персонального компьютера. Этот блок содержит четыре канала для подключения аналоговых датчиков, 16-ти битовый аналого-цифровой преобразователь с максимальной частотой дискретизации 100 кГц. При этом, в соответствии с теоремой Котельникова возможно восстановление сигнала с верхней частотой 50 кГц, что при исследовании электромагнитного излучения (ЭМИ) конструкционных материалов не всегда достаточно. В качестве программного обеспечения для первичной обработки сигналов ЭМИ в данной работе использовано программное обеспечение VI Logger [4]. При конкретной обработке экспериментальных данных и прогнозировании

поведения конструкционных материалов в конкретных условиях можно пользоваться рекомендациями В.Д. Борисова [5]. Структурная схема информационно-измерительной системы приведена на рис. 1.

Некоторые результаты. Исследования выполнены на трех образцах меди в виде цилиндров диаметром 2,4 мм, длиной 5,6 мм на образце бронзы и на трех образцах латуни диаметром 4 мм и длиной 8 мм, нагружаемых сжимающей нагрузкой. Использовался пресс с ручным приводом. Нагрузка прикладывалась равномерно со скоростью не выше 0,05 см/с. В качестве первичных датчиков ЭМИ, использовались емкостная и магнитная антенны.

В процессе экспериментов регистрировались сигналы ЭМИ и параметры нагрузки (осциллограммы последних не приводятся здесь ввиду большого объема иллюстраций). В качестве примера на рис. 2, 3, 4, 5 приведены две осциллограммы для образцов меди и по одной осциллограмме для латуни и бронзы, нагружавшихся сжимающей нагрузкой.

Важнейшие результаты выполненных исследований следующие. В момент перехода нагружаемых образцов из одного состояния в другое (из состояния упругого деформирования в

пластическое состояние, при формировании трещин и микротрещин, при разрушении образца) во всех случаях на осциллограмме ЭМИ появлялись импульсы повышенной амплитуды. Наибольшие по величине амплитуды импульсов ЭМИ наблюдаются при приближении разрушения образца и в процессе его разрушения.

Выполнены исследования на образцах из находившихся в эксплуатации материалов, в частности, из медных жил силовых кабелей. Каких-либо отличий в электромагнитных сигналах, судя по осциллограммам ЭМИ, установлено не было.

Однако при исследовании стальных образцов из шахтной крепи, отобранных из элементов крепи, находившихся в эксплуатации в течение многих лет, некоторые особенности при сравнении осциллограмм ЭМИ из образцов длительной эксплуатации и образцов из элементов крепи, отобранных на складе, наблюдались. В частности, на осциллограммах образцов из эксплуатации, как правило, наблюдается повышенное количество высокочастотных импульсов ЭМИ на всех этапах нагружения образца, что свидетельствует о наличии в таких образцах усталостных микротрещин. Аналогичная ситуация наблюдалась и в некоторых медных образцах, взятых из материалов, находившихся в длительной эксплуатации.

При исследовании процессов, протекающих в предельно нагруженных твердых материалах, в том числе, конструкционных, по их электромагнитному излучению, фиксируемому на осциллограммах ЭМИ, возникает дилемма: исследовать весь процесс разрушения от начала приложения нагрузки до потери сплошности, или отдельные участки этого процесса. В первом случае необходимо получить осциллограмму всего процесса от на-

чала нагружения до момента полной потери начальной формы исследуемым образцом. Этот процесс занимает до 2-3 минут. Во втором случае, если регистрировать процесс, например, через 1 секунду или 1 миллисекунду, то получаем локальные участки осциллограмм. При этом общая направленность процесса остается неясной, но сами отдельные участки содержат подробную информацию. Во втором случае исчезает представление о процессе в целом. Попытки получить осциллограмму, содержащую подробную информацию о всем процессе, приводит к осциллограммам большой длины.

Ниже при анализе принят первый вариант – иметь на осциллограммах весь процесс.

В рассмотренных экспериментах в процессе нагружения цилиндрические образцы вначале изгибались (первые импульсы), а затем расплющивались в моменты наибольших импульсов и превращались в тонкие диски эллиптической формы.

Рассмотрим, в качестве примера, подробнее осциллограмму ЭМИ (рис. 2) при сжатии медного цилиндра. Первый импульс «а» $U_a=1.7(-3.0)=(4.7 \text{ В})$ соответствует моменту включения $t=29:56.6 \text{ с}$. Затем в момент времени $t=30:01.5 \text{ с}$ сформировался импульс «б» $(0.6 \text{ В}; -2.9 \text{ В})$. В этот момент в деформируемом сжатием материале произошло мгновенное изменение структуры материала – пластическая деформация. При этом импульс состоит из двух импульсов «б» и «б'». Далее, в момент времени $30:03.375$, формируется импульс «в» $(1.8 \text{ В}; -5.8 \text{ В})$ и серия мелких импульсов «в'». Импульс «в» $=7.6 \text{ В}$ – это наибольший по амплитуде импульс во всем зарегистрированном сигнале. Этому импульсу соответствует некоторое разрушение образца в виде

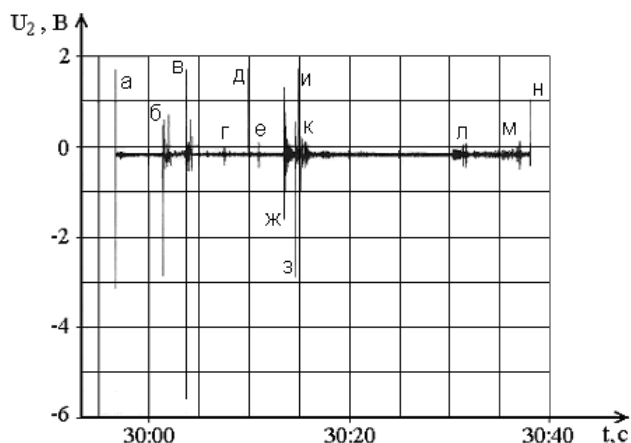


Рис. 2. Осциллограмма сигнала ЭМИ сжимаемого образца: медная проволока, диаметром 2.4 мм, высотой 5.3 мм. После сжатия диаметр 4.4 мм, высота 2.2 мм

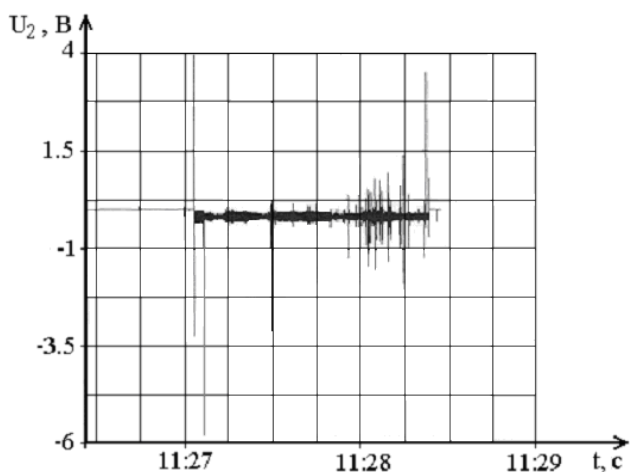


Рис. 3. Осциллограмма сигнала ЭМИ сжимаемого образца: медная проволока, диаметром 2.4 мм, высотой 5.3 мм. После сжатия диаметр 4.3 мм, высота 2.7 мм

скачка пластической деформации. Следующий импульс «г» на осциллограмме имеет меньшую амплитуду 0.4 В, возник в момент времени $t=30:07.5$ с. Далее формируется импульс «д» с амплитудой 1.8 В и (-0.2

В. На осциллограмме этот импульс слился с вертикальной координатной линией $t=30:10$ с. Следующий импульс «е» – симметричен и равен ± 0.3 В. Далее следует пачка импульсов «ж», амплитуда первого из которых ($1.3 \text{ В} \div (-1.5) \text{ В}$) или в сумме 2.8 В. Далее тонкий по времени импульс «з» с амплитудой ($0.7 \text{ В} \div (-2.8) \text{ В}$). Следующий импульс «и» слился с координатной линией $t=30:15$ с. Его положительная полуамплитуда 2 В, отрицательная полуамплитуда (-1) В. Этот импульс включает пачку мелких импульсов, последующий из которых «к». Следующий импульс состоит из пачки «л». Затем идет серия мелких импульсов и импульс «м» с амплитудой 0.3 В и (-0.3) В. Наконец, последний на осциллограмме импульс «н» соответствует отключению регистрирующей системы, в момент времени $t=30:38$ с. Полная длительность зарегистрированного сигнала 39.3 с. Длительный импульс получен за счет низкой скорости нагружения.

Рис. 3. Осциллограмма сигнала сжимаемого образца меди в виде цилиндра диаметром 2.4 мм и длиной $l=5.5$ мм. Начало нагружения 11:27.02 с. Окончание нагружения $t=11:28.47$ с, общая длительность сигнала 1.45 с.

Подробно анализировать эту осциллограмму не будем. Ее особенность – использован образец меди, взятой из изделия с длительным

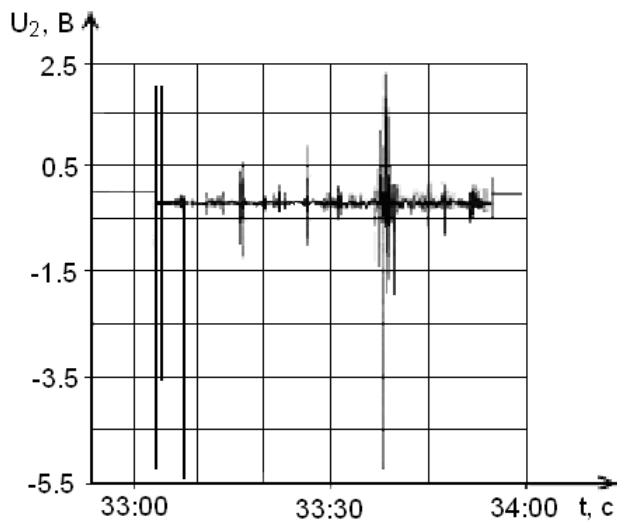


Рис. 4. Осциллограмма сигнала ЭМИ сжимаемого образца: латунь, диаметром 2.5 мм, высотой 8 мм. После сжатия диаметр 4 мм, высота 2.7 мм

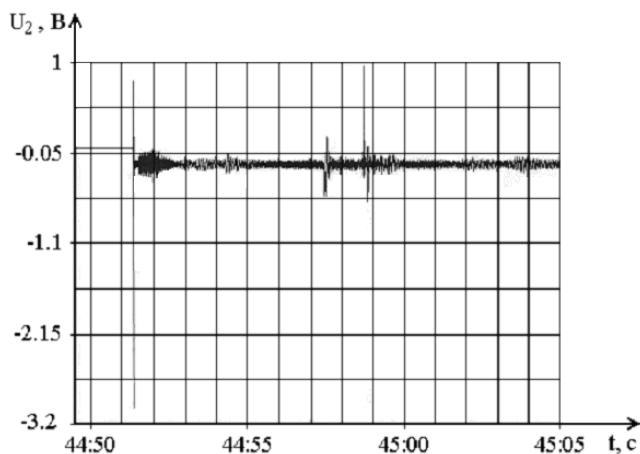


Рис. 5. Осциллограмма сигнала ЭМИ сжимаемого образца: бронза, диаметр 2.4 мм, высота 5.5 мм. После сжатия диаметр 5 мм, высота 2.4 мм

периодом эксплуатации. Последнее проявилось на осциллограмме в большом количестве импульсов повышенных частот перед потерей нагруженным образцом несущей способности (момент разрушения $t=11:28.25$ с). Повышенная полу-

волна импульса в момент разрушения составила около 1.5 В, отрицательная – 1.3 В.

С использованием преобразования Фурье рассчитывались для отдельных образцов спектрально-временные таблицы (СВТ) [3]. В таких таблицах по столбцам выделялись частоты, по строкам амплитуды на фиксированных отрезках времени сигнала ЭМИ. Строки в СВТ отмечались через равные промежутки времени, обычно через 1 миллисекунду. В таких таблицах СВТ всегда присутствуют участки с высокими амплитудами, обычно приуроченные к повышенным частотам, формирующимся при приближении процесса разрушения. Для упомянутых материалов осциллограммы ЭМИ получены впервые. Такие особенности диаграмм СВТ известны и для образцов горных пород [3]. Для образцов, изготовленных из материалов, находившихся в эксплуатации, в СВТ-таблицах наблюдается повышенное количество локальных максимумов на различных частотах. Предположительно – это признак старения материала. Однако требуются

дополнительные исследования материалов, подвергшихся процессу старения.

Таблицы СВТ анализировались на наличие в них участков, соответствующих S-диаграммам. Такие диаграммы для образцов из меди, бронзы

и латуни относительно подобны соответствующим диаграммам для других конструкционных материалов, исследовавшихся раньше, в том числе, образцов из дюралюминия, алюминия, стали, а также для образцов горных пород [3]. Помимо спектрально-временного анализа использовались элементы фрактального анализа при оценке поверхностей разрушения [6].

Выполненные исследования показали, что электромагнитное излучение деформируемых конструкционных материалов содержит информацию о их остаточной прочности. На этой основе, возможно, организовать специальные контрольные испытания по оценке остаточной прочности и долговечности, находящихся в длительной эксплуатации используемых в горной промышленности машин, механизмов, конструкций, узлы и детали которых в той или иной мере подвергаются процессу старения при длительной эксплуатации.

Рис. 4. Осциллограмма ЭМИ при нагружении сжимающей нагрузкой образца латуни, диаметр 2.5 мм, длина 8 мм. Основная особенность – наличие больших по амплитуде составляющих. Цена деления на оси абсцисс $(33.30-33.0)/3=10$ с. Разрушение приурочено ко времени 33:38.8 с. Положительная полуволна максимальной амплитуды 2.5 В, отрицательная полуволна (-5.4) В. Общая амплитуда 7.9 В. Разрушению предшествовали два повышенных импульса в момент времени 33:17 с и 33:27 с. Их амплитуда 2.0 В. На этом этапе образец был сжат до пластинки диаметром 4.3 мм и толщиной 2.7 мм. При дальнейшем

возрастании нагрузки, в течение 1.5 с продолжали фиксироваться импульсы, но малых амплитуд.

Рис. 5. Осциллограмма сигнала ЭМИ сжимаемого образца бронзы, диаметр 2.4 мм, длина 5.5 мм. Эта осциллограмма образца бронзы заметно отличается от трех предыдущих однородностью структуры. Длительность сигнала 15 с. Сразу после приложения нагрузки образец перешел в квазипластическое состояние. Наблюдается две пачки импульсов при $t=44:57.5$ с и при $t=44:58.5$ с (44 мин.:58.5 с). Максимальная положительная амплитуда 1.0 В, отрицательная (-0.5) В.

Таким образом, в рассмотренных экспериментах для образцов меди и ее сплавов получены осциллограммы сигналов их электромагнитного излучения за время от начала нагружения до потери формы и сплошности образца и полной пластической деформации. Установлено, что в момент перехода из упругого состояния в пластическое в сигнале ЭМИ формируется импульс с повышенной амплитудой. Этот эффект может использоваться на практике в качестве признака изменения механического состояния нагруженного материала.

Структура сигналов ЭМИ меди, латуни и бронзы различна. Повышенные сигналы ЭМИ на отдельных этапах процесса наблюдались на образцах меди и латуни (-5.5) В. На образце бронзы повышенный сигнал составил 1В. Во всех случаях деформируемые образцы при медленном нагружении переходили в пластическое состояние и этот переход сопровождался повышенным импульсом ЭМИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов В.П.* Определение параметров кинетического уравнения долговечности горных пород по данным измерения их прочности на растяжение при разных скоростях нагружения // ФТПРПИ. - № 3. - 2006. - С. 11-17.
2. *Разрушение.* Том 3. Инженерные основы и воздействие внешней среды. Под ред. Г. Либовица. - М.: Мир. - 1976. - 798 с.
3. *Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород* / М.В. Курленя, А.Г. Вострецов, Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая. - Новосибирск: изд-во СО РАН. - 2000. - 232 с.
4. *Тревис Дж.* LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс: Прибор Комплекс, 2005. - 544 с.
5. *Борисов В.Д.* Спектрально-временной анализ в исследовании динамики разрушения горных пород // ФТПРПИ. - 2005. - № 4. - С. 49-59.
6. *Борисов В.Д.* Фрактальные свойства спектральных характеристик электромагнитного излучения при разрушении горных пород и конструкционных материалов // ФТПРПИ. - 2007. - № 2. - С. 55-68. **ИАБ**

Коротко об авторах

Ефремова М.Д., Кулаков Г.И., Морозова Г.В. - ИГД СО РАН, igds@ysn.ru



СЛУЧАИ ИЗ ЖИЗНИ ПРОФЕССОРА ПЕТЬКИНА

Случай второй. Любовь не знает границ

Петькин был упитанным деревенским увальнем. Нравился девушкам своей простотой и отменным здоровьем. Но еще больше почитательниц было у него среди жен вечно занятых профессоров. И одну такую молодую и симпатичную жену он тоже полюбил, подружился с ее мужем и сыном, заходил в гости, любил сыграть с мужем в шахматы, звал его просто Сашей. Петькину нравилось панибратство с известным ученым. И как-то незаметно профессор стал для него ближе, чем его возлюбленная — жена профессора. Ученый терпел.

А молодой жене стал надоедать обленившийся любовник, забывший про свои основные обязанности. В молодости люди легко расстаются и сходятся. И пока пара поднадоевших ей мужчин гоняла чай, забавлялась с младенцем и решала шахматные задачи, неверная жена и любовница принимала ухаживания какого-то третьего красавчика.

Долгими зимними вечерами трое влюбленных мужчин ждали молодую маму, скучали и мучались подозрениями. Самым ревнивым оказался Петькин. Не умея сдерживать своих переживаний, он заявил поздним вечером: «Вы знаете, Саша, кажется, у нее кроме нас с вами появился еще кто-то».

Из книги Л.Х. Гитиса «Верхом на тигре». М.: Горная книга, 2009. С. 201